

**PEMANTAUAN BERBIAYA RENDAH TIDAK MERUSAK PROSES  
MILLING KERING BAHAN ILMENIT MENGGUNAKAN GELOMBANG  
BUNYI AKUSTIK UNTUK MENDUKUNG INDUSTRI 4.0**

*Low Cost Non-Destructive Monitoring of Dry Milling Process of Ilmenite  
Material Using Acoustic Sound Wave to Support Industry 4.0*

**Handoko Setyo Kuncoro<sup>\*)</sup> dan Dadan Sumardan<sup>\*\*)</sup>**

<sup>\*)</sup>kontributor utama <sup>\*\*)</sup>kontributor anggota

Balai Besar Keramik  
Jl. Jend Ahmad Yani 392, Bandung, Indonesia

Email: kuncoro.hs@gmail.com

Naskah masuk: 30 Juli 2020, Revisi 1: 17 September 2020, Diterima: 23 September 2020

**ABSTRAK**



potensi pemanfaatan dan karakteristik gelombang bunyi akustik pada rentang frekuensi 100-10000 Hz untuk proses pemantauan *milling* bahan ilmenit industri dievaluasi berdasarkan evolusi taraf intensitas bunyi dan jumlah puncak dari spektrum kurjanya. Metodologi dalam penelitian aplikatif ini mengikuti langkah-langkah kegiatan persiapan bahan, proses *milling* kering, pemantauan emisi akustik *milling*, proses pengayakan/*filtering* ukuran butiran, kuantisasi distribusi ukuran partikel serta analisis dan evaluasi data penelitian. Waktu proses *milling* dari 0,5, 15 hingga 30 jam diambil sebagai variasi penelitian. Hasil evaluasi Anova menunjukkan adanya hubungan yang signifikan antara waktu *milling* dengan karakteristik jumlah puncak emisi gelombang akustik proses *milling*. Graduasi warna yang tinggi pada evolusi spektrum frekuensi antara 160-640 Hz menurun seiring dengan bertambahnya waktu *milling* dan mengecilnya distribusi ukuran partikel. Jumlah puncak-puncak spektrum bunyi juga meningkat bersamaan dengan bertambahnya waktu *milling*. Hal ini mengindikasikan efektifitas penumbukkan oleh bola-bola alumina pada bahan ilmenit yang diproses dan memiliki potensi implikasi pada pemakaian *ball mill* yang lebih terkontrol dan efisien di industri keramik nantinya.

**Kata Kunci :** *Milling* kering, ilmenit, spektral akustik, ukuran partikel, waktu *milling*.

**ABSTRACT**

*The potential utilization and characteristics of acoustic sound waves in the frequency range of 100-10000 Hz for the monitoring process of dry milling of industrial ilmenite materials are evaluated based on the evolution of sound intensity level and the number of peaks in the spectrum waves. The methodology in this applicative research follows the steps of material preparation activities, dry milling process, acoustic milling emission monitoring, particle size shieving / filtering, quantization of particle size distribution and evaluation of research data. The milling times from 0.5, 15 to 30 hours are taken as a variation of the study. Statistical ANOVA evaluation results show a significant relationship between milling time and the characteristics of the peak number of acoustic wave emitted milling process. Higher color gradient in the evolution plot of the frequency spectrum between 160-640 Hz decreases with increasing milling time and decreasing particle size distribution. The number of spectral peaks also increases with increasing milling time. This indicates the effectiveness of collision by alumina balls in the processed ilmenite material using dry milling and has potential implications for the use of a more controlled and efficient ball mill in the future of ceramic industry.*

**Keywords:** *Dry milling, ilmenite, acoustic spectral, particle size, milling time*

**I. PENDAHULUAN**

Pemecahan permasalahan penyediaan energi terbarukan (seperti sel bahan bakar dan baterai) beserta proses produksinya untuk kendaraan, dewasa ini sedang menjadi topik hangat dalam penelitian. Bahkan penelitian baterai ion lithium sudah menjadi salah satu Prioritas Riset Nasional di Indonesia [1]. Teknologi bahan bernilai tambah tinggi dan dapat digunakan sebagai bahan baku baterai ion lithium adalah material Lithium Titanat [2]. Material ini bisa disintesis dari kompon litium dan

bahan ilmenit. Bahan ilmenit harus diolah terlebih dahulu untuk mendapatkan bahan titania [3][4]. Proses pengolahan ilmenit bisa dilakukan melalui tahapan proses fisika dan kimia. Proses fisika utama dalam pengolahan bahan baku yang umumnya digunakan adalah proses *milling*. Efisiensi proses *milling* ini cukup penting mengkonsumsi energi sekitar 15-25%[5] dari seluruh proses pengolahan dalam pabrikasi bahan baku mineral, bahkan telah diklaim mengkonsumsi tenaga listrik dunia

sebesar 4% [6]. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa proses *milling* bukan hanya digunakan untuk menghomogenkan campuran tapi juga bisa menentukan distribusi ukuran partikel dari bahan baku yang diproses[7]. Dalam penelitian ini bahan ilmenit dipilih karena potensi aplikasinya yang luas. Lebih jauh telah diketahui bahwa bahan ilmenit yang hanya diproses *milling* kering saja secara langsung dapat dimanfaatkan sebagai bahan *blasting agent/blast cleaning*[8]. Nilai bisnis bahan ilmenit saat ini cukup tinggi. Harga di pasaran dunia ilmenit saat ini mencapai US\$ 150/ton sedangkan cadangan mineralnya di Indonesia yang diketahui mencapai 40 juta ton yang memiliki nilai bisnis sekitar 88 milyar rupiah atau sekitar 2,64 milyar rupiah per tahun. Oleh karena itu, jika terealisasi, bisnis bahan baku ilmenit masuk dalam kategori industri besar (omzet > 300 juta rupiah per tahun).

Mutu proses *milling* adalah salah satu kunci keberhasilan dalam bisnis mineral ilmenit yang diolah. Hal ini yang mengakibatkan penelitian efisiensi proses *milling* terus dikembangkan oleh para peneliti. Riset-riset ini ada yang bersifat analitik [9][10][11][12] ada juga yang

berbasis semi empiris [13][14] serta eksperimental [15][16]. Obyek-obyek yang diteliti juga sangat beragam mulai dari pengaruh ukuran diameter *ball mill* [17], jumlah bahan yang dimasukkan [18], kecepatan putaran *ball mill*[19], waktu *milling* [20] hingga pemantauan proses *milling*[21]. Pemantauan proses *milling* online memiliki peran penting dalam efisiensi dan pengendalian mutu proses *milling*. Sebagai contoh waktu *milling* yang berlebihan akan menyebabkan pemborosan energi listrik, sebaliknya bila waktunya kurang dapat menurunkan mutu yang dihasilkan.

Pemantauan *ball mill* secara langsung umumnya memerlukan peralatan pemantauan yang canggih yang tentu saja mahal harganya. Misalnya untuk studi distribusi ukuran butiran yang dihasilkan oleh *ball mill* diperlukan peralatan *particle size analyzer* (PSA) dengan harganya paling murah US\$ 9500 (merk CYEEYO buatan Tiongkok). Untuk mempelajari bunyi emisi akustik yang dihasilkan proses *milling* diperlukan *audio analyzer* dengan harga termurah sekitar US\$ 1480 merk PAA6. Alat-alat pemantauan ini memerlukan waktu yang cukup untuk *setting* peralatannya. Selain itu *audio*

*analyzer* yang murah tidak dilengkapi laporan evolusi spektral emisi.

Penelitian ini bertujuan memberikan metode yang lebih mudah dan murah untuk melakukan pemantauan proses *milling* kering dengan model *ball mill* kecil (*pot mill*) menggunakan emisi gelombang bunyi akustik yang dihasilkan saat proses *milling*. Semua aplikasi perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini tidak berbayar, kecuali bawaan dari laptop seperti program *Excel* dari *Microsoft Office*. Peralatan PSA diganti dengan pengukuran manual dengan menggunakan 2 ayakan teknis seharga US\$36.

## II. METODOLOGI PENELITIAN

Struktur metodologi penelitian ini meliputi uraian bahan dan peralatan yang digunakan, beserta metode-metode yang dipakai dalam analisis dan evaluasi hasil penelitian.

### 2.1 Bahan dan peralatan

Bahan ilmenit yang digunakan dalam penelitian ini sumbangan dari PT. Monokem Surya dengan massa jenis 4,5-5,0 g/cm<sup>3</sup>. Produk samping ilmenit ini masih bercampur dengan ferit sekitar 20%, sehingga diperlukan magnet *separator* untuk mengambil bagian feritnya. Selain itu untuk

mengurangi jumlah pengotor yang bukan kompon logam, bahan telah dicuci dan dikeringkan terlebih dahulu sebelum masuk dalam proses *milling*. Batas julat distribusi ukuran partikel yang terbesar diasumsikan 400 mikron [8].

Selengkapnya, selain *pot mill*, peralatan utama yang digunakan dalam pemantauan proses *milling* diantaranya:

1. Timbangan digital;
2. Dua buah ayakan teknis dengan ukuran mesh 100 (149 mikron) dan 270 (53 Mikron);
3. *Smartphone* android umumnya;
4. *Timer*/jam;
5. Laptop biasa.

Timbangan dan ayakan digunakan untuk menghasilkan estimasi distribusi ukuran partikel sebagai pengganti alat PSA. Untuk memvalidasi asumsi batas atas ukuran partikel pasir ilmenit 400 mikron, telah diayak menggunakan ayakan mesh 40 (417 mikron) sebanyak 100 g pasir ilmenit dan menyisakan 0,35 g pasir (kesalahan 0,35% masih dibawah 0,5%). Adapun tambahan perangkat lunak yang diperlukan dalam penelitian ini diantaranya:

1. *Spectroid*
2. *WebPlotDigitizer 4.3*
3. *Excel*.

Aplikasi *Spectroid* [22] digunakan untuk mengukur spektral taraf intensitas bunyi akustik dari *ball mill*. Karena aplikasi ini tidak didukung konversi data ke *Excel*, maka diperlukan pemindahan data gambar dari *Spectroid* ke dalam *data sheet Excel* menggunakan *WebPlotDigitazer 4.3*[23]. Program *Excel* dipilih karena dilengkapi dengan perangkat evaluasi statistik *ANOVA*. Untuk kemudahan parameter pengukuran spektral akustik dari *Spectroid* dipilih *default* dari aplikasi, yakni:

- *Sampling rate*: 48 kHz;
- *FFT size*: 512 bins (94 Hz/bin);
- *Decimations*: 5(2,9Hz/bin@DC);
- *Desired Transform Interval*: 20 ms (50Hz);
- *Exponential smoothing factor*: 0,3;
- *Window function*: Blackman-Harris.

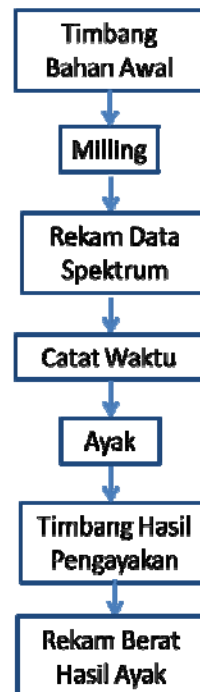
Semua aplikasi bisa didownload dan digunakan secara gratis dari internet (kecuali program *Excel* yang merupakan bawaan dari *Microsoft Office*).

## 2.2. Metode

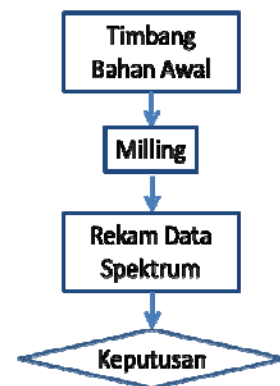
Kegiatan pemantauan *ball mill* dalam penelitian ini meliputi aktivitas riset dan implementasi, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Aktivitas risetnya meliputi menimbang bahan

awal, proses *milling*, merekam data spektral, mencatat waktu, mengayak, Menimbang hasil ayak dan merekam berat hasil pengayakan. Tahapan implementasinya meliputi aktivitas menimbang bahan awal, proses *milling*, merekam data spektral dan pengambilan keputusan. Ketika merekam data spektral diusahakan tidak ada gangguan suara lain. Ukuran potmill yang digunakan 2500 ml, isi bahan 2,514 kg, isi bola giling 17 buah @ 0,7585 kg, jenis bola alumina. Mikrofon diletakkan pada jarak 5 cm dari potmill.

### Aktivitas Riset



### Implementasi



**Gambar 1.** Diagram alir metode penelitian

Walaupun aktivitas riset cukup banyak, namun implementasinya bisa cukup sederhana karena frekuensi *milling*/gerus dari *ball mill* sudah diketahui melalui aktivitas riset. Secara garis besar penelitian ini menggunakan metode studi banding sederhana yakni:

1. Mengevaluasi hasil ukuran butiran dari tiga variasi waktu proses *milling* kering (0,5 jam, 15 jam dan 30 jam) menggunakan timbangan digital dan ayakan teknis.
2. Membandingkan sifat emisi spektral gelombang akustik (akumulasi peak dan graduasi warna evolusi spektral) dari variasi waktu *milling* 0,5 jam, 15 jam dan 30 jam.
3. Mengevaluasi secara statistik pengaruh hasil *milling* (melalui waktu *milling*) dan julat frekuensi spektral aktif terhadap jumlah peak spektral yang dihasilkan menggunakan ANOVA dua arah tanpa pengulangan. Hasil ini akan dijelaskan pada subjudul berikutnya.

### III. HASIL DAN BAHASAN

#### 3.1. Evaluasi Distribusi Ukuran Partikel

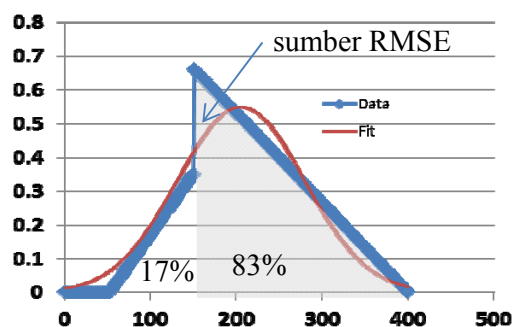
Untuk menjelaskan hasil analisis distribusi ukuran partikel hasil *milling*

diambil contoh hasil *milling* dari waktu *milling* 0,5 jam diperoleh data ayakan seperti pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Hasil pengayakan waktu *milling* 0,5 jam

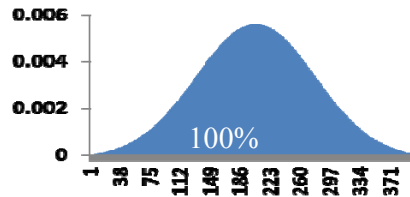
Julat Ukuran Partikel (mikron)			
<53	53-150	150-400	>400
0%	17%	83%	0%

Hasil pengayakan pada Tabel 1 bisa dibuat grafik distribusi partikelnya dengan pendekatan sederhana berupa garis-garis lurus dan miring. Garis lurus untuk hasil dengan ukuran partikel 0 atau yang mendekatinya, sehingga bisa diplot grafiknya sebagai berikut.



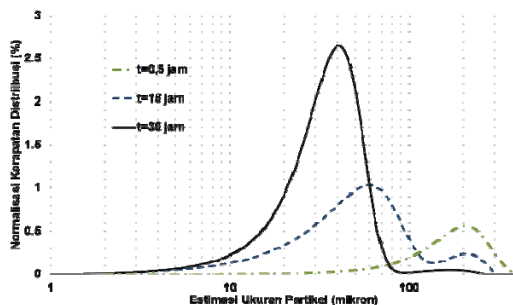
**Gambar 2.** *Fitting curve* untuk garis-garis distribusi ukuran partikel.

Syarat pendekatan ini adalah luasan dibawah garis harus sesuai dengan persentase hasil timbangan berat sesuai Tabel 1. Kemudian dilakukan *fitting curve* pada garisnya seperti ditunjukkan dalam Gambar 2. Untuk penyempurnaan data dilakukan normalisasi hasil *fitting curve* dengan total luasan dibawah kurva harus 100% seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



**Gambar 3.** Normalisasi distribusi ukuran partikel waktu *milling* 0,5 jam.

Umumnya hasil PSA berbentuk genta (kurva normal) baik yang berpuncak 1 atau lebih. Puncak-puncak tersebut mudah dideteksi dengan segitiga yang bisa diwakili oleh garis miring dan lurus (bukan 2 data). Dengan cara yang sama bisa dilakukan estimasi distribusi ukuran partikel untuk waktu *milling* yang lain (15 jam dan 30 jam) sehingga diperoleh hasil lengkap distribusi ukuran partikel seperti Gambar 4.



**Gambar 4.** Estimasi distribusi ukuran partikel dari hasil pengayakan tabel 1 untuk waktu *milling* 0,5 jam, 15 jam dan 30 jam.

Hasil penimbangan ayakan diwakili oleh persentasinya untuk memudahkan proses analisis secara keseluruhan. Bila dievaluasi akan nampak bahwa terjadi transisi distribusi ukuran partikel pada waktu

*milling* 15 jam seperti ditunjukkan Gambar 5. Untuk mengetahui kehandalan hasil estimasi ini dihitung akar kuadrat kesalahan rata-ratanya (RMSE). Hasil perhitungan RMSE berdasarkan julat ukuran butirannya ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Hasil perhitungan RMSE untuk pengayakan dengan waktu *milling* 0,5 jam

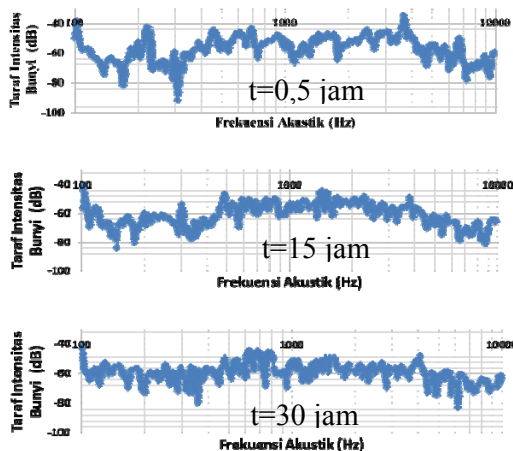
	Ukuran Butiran (mikron)		
	0-53	53-150	150-400
RMSE	6,94%	7,21%	12,57%

Nampak dalam Tabel 2 sumber kesalahan RMSE terbesar berada pada julat 150-400 mikro. Hal ini sesuai dengan yang ditunjukkan pada Gambar 2 sebelumnya. Rata-rata RMSE tiap julat distribusi ukuran partikel sekitar 8,91% sedikit lebih besar dibanding hasil penelitian menggunakan algoritma genetik tapi dengan perhitungan yang lebih kompleks dan rumit [5].

Sebenarnya dari hasil ini sudah cukup untuk pemantauan proses *milling* yang murah tapi masih sangat kurang praktis, dengan bahan harus dikeluarkan dulu per waktu *milling* untuk diayak dan dianalisis dsitribusi ukuran partikelnya. Oleh karena itu, akan dilakukan analisis spektral emisi gelombang akustik yang tidak mengganggu jalannya proses *milling*.

### 3.2. Analisis Spektral Emisi Gelombang Akustik

Emisi gelombang akustik yang ditangkap *smartphone* melalui aplikasi *Spectroid* dibatasi dari frekuensi 100 Hz hingga 10 kHz. Pada saat dilakukan konversi dari grafik *Spectroid* ke data sheet *Excel* menggunakan *WebPlotDigitizer 4.3*, *noise* titik-titik yang tidak terhubung dengan garis sinyal utama dihilangkan. Jarak antar titik yang diambil datanya disesuaikan sedemikian sehingga puncak-puncak kurva bisa tersalin dengan baik.



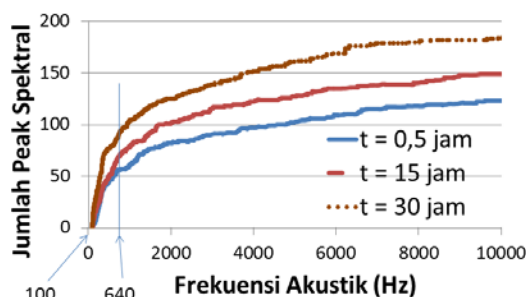
**Gambar 5** Hasil digitalisasi sinyal menggunakan aplikasi online.

Konversi digitalisasi lengkap untuk ketiga waktu *milling* ditunjukkan dalam Gambar 5 sedangkan hasil pencarian frekuensi untuk puncak taraf intensitas bunyi akustik bisa diperoleh dengan formulasi berikut :

$$F_p = F_t, \text{ jika } F_t > F_{t-1} \text{ dan } F_t > F_{t+1}$$

sehingga akumulasi puncak-puncaknya bisa dihitung dan diplot.

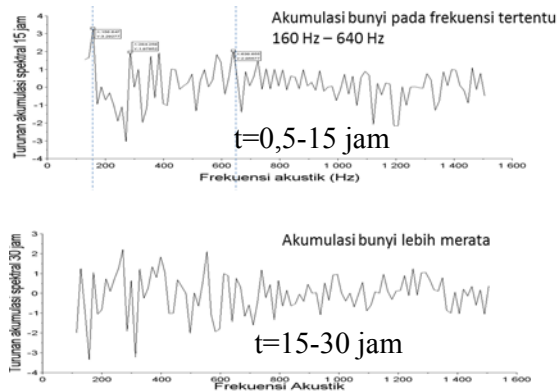
Mengingat ukuran partikel bukan nilai tunggal tapi bersifat terdistribusi, untuk melihat hubungan langsung distribusi ukuran terhadap jumlah puncak dapat dilakukan dengan mengaitkan Gambar 4 terhadap hasil akumulasi puncak-puncak spektral seperti ditunjukkan Gambar 6.



**Gambar 6** Akumulasi puncak-puncak spektral akustik pada tiap waktu *milling*.

Ada perbedaan yang cukup signifikan antara kurva akumulasi puncak-puncak spektral emisi akustik untuk tiap-tiap waktu *milling* seperti ditunjukkan Gambar 6. Total jumlah puncak kurva untuk  $t=0,5$  jam adalah 123 puncak, sedangkan untuk  $t=15$  jam dan  $t=30$  jam masing-masing 149 dan 184 puncak secara berurutan. Untuk memonitor di julat frekuensi mana emisi akustik aktif mewakili proses *miling* (frekuensi gerus) perlu dibandingkan hasil akumulasi ini untuk ketiga waktu *milling* dengan mungurangkan dan menurunkannya.



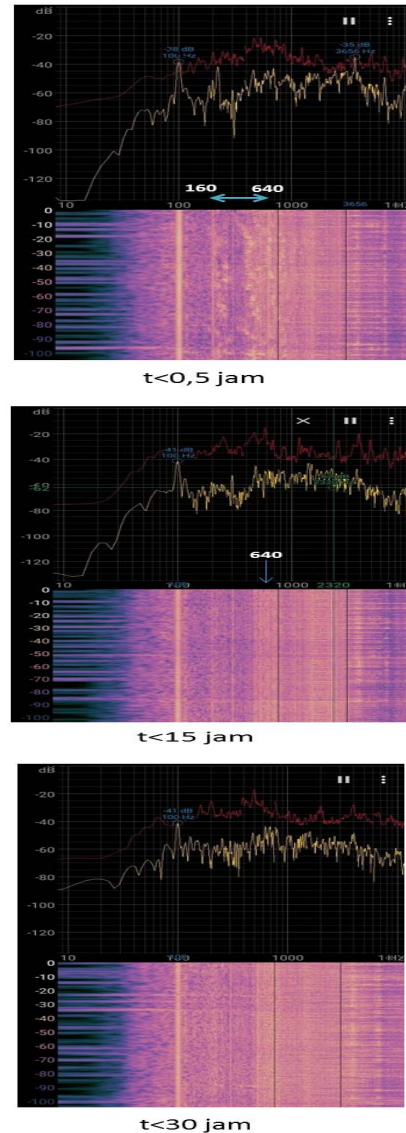


**Gambar 7** Hasil perhitungan turunan akumulasi untuk waktu *milling* 15 jam pertama dan kedua.

Nampak bahwa hasil turunan akumulasi pada 15 jam kedua proses *milling* lebih merata di sekitar 2 puncak sedangkan turunan akumulasi pada 15 jam pertama di daerah frekuensi 160-640 Hz naik hingga 3 puncak. Pada julat frekuensi gerus inilah diemisikan gelombang akustik yang mewakili terjadinya proses *milling*. Untuk membuktikan hasil ini diperlukan analisis visual dari evolusi spektral emisi akustik dari proses *milling* dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 8.

Bila diamati perubahan evolusi emisi spektral gelombang akustik untuk masing-masing waktu *milling*, maka akan ditemukan di daerah julat frekuensi 0-640 Hz terjadi perubahan yang cukup signifikan. Hal ini sesuai

dengan pengukuran frekuensi gerus sebelumnya. Nampak bahwa graduasi warna lebih banyak ditemukan pada frekuensi tersebut pada waktu *milling*  $t=0,5$  jam dan berangsur-angsur hilang merata pada waktu *milling* selanjutnya.



**Gambar 8** Hasil plot evolusi emisi spektral gelombang akustik oleh proses *milling* dengan durasi 0,5 jam, 15 jam dan 30 jam.

Bila demikian kita bisa membuat hipotesis bahwa proses *milling* mempengaruhi emisi gelombang akustik pada penurunan jumlah puncak-puncak spektralnya di sekitar frekuensi 0-640 Hz. Untuk membuktikan hipotesis tersebut diperlukan evaluasi lanjut menggunakan statistik ANOVA.

### 3.3. Evaluasi dari Statistik ANOVA

Sebagaimana dijelaskan dalam sub judul Metode sebelumnya bahwa statistik Anova dua arah tanpa pengulangan yang digunakan untuk mengambil faktor pengaruh waktu *milling* dan julat frekuensi pada jumlah-jumlah puncak spektral gelombang akustik. Untuk batas julat frekuensi yang ditentukan, nilai frekuensi 640 diambil dari frekuensi gerus, sedangkan 3000 dan 10000 diambil mengikuti fungsi eksponensial  $Ae^{k \cdot x}$  dengan  $A=171,37$  dan  $k=1,3744$  yang memberikan nilai kehandalan cukup baik yakni 0,9949 untuk  $x=1,2,3$  pada titik-titik frekuensi yang ditentukan. Oleh karena itu, akumulasi jumlah puncak bisa ditabelkan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Dari data jumlah puncak dalam Tabel 3, dan dengan mengambil nilai keberterimaan  $\alpha=0,05$  diperoleh hasil

perhitungan ANOVA seperti ditunjukkan Tabel 4.

**Tabel 3.** Jumlah puncak untuk masing-masing faktor julat frekuensi dan waktu *milling*.

Perlakuan	Julat Frekuensi		
	100-640	640-3000	3000-10000
T<0,5 jam	51	39	33
T<15 jam	62	53	34
T<30 jam	83	56	45

**Tabel 4.** Hasil perhitungan ANOVA dua arah tanpa pengulangan untuk faktor waktu *milling* dan julat frekuensi.

Faktor	F	P-value	F crit
Waktu <i>milling</i>	7,94068	0,04048	6,9443
Julat frekuensi	15,0509	0,01376	6,9443

Untuk waktu *milling*, harga  $F > F_{crit}$  dan harga  $P < 0,05$ , sehingga bisa disimpulkan bahwa waktu *milling* mempengaruhi secara signifikan terhadap jumlah puncak spektral emisi akustik. Ternyata untuk julat frekuensi memiliki hasil perhitungan ANOVA yang serupa yaitu dengan harga  $F > F_{crit}$  dan harga  $P < 0,05$  sehingga bisa disimpulkan bahwa julat frekuensi yang diambil juga mempengaruhi secara signifikan jumlah puncak spektral emisi akustik.

Pada penelitian sebelumnya [24], perpanjangan waktu *milling* dapat menggeser distribusi ukuran partikel bahan keramik, semakin lama waktu *milling* semakin halus hasilnya. Dengan demikian hasil-hasil evaluasi pada subjudul sebelumnya bisa diterapkan karena waktu *milling* telah dibuktikan secara praktis dan dalam banyak publikasi [25][26][27] sangat mempengaruhi hasil proses *milling*.

#### IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Beberapa hal yang bisa disimpulkan dalam penelitian ini diantaranya:

- Waktu *milling* mempengaruhi distribusi ukuran partikel hasil proses *milling* kering yang dilakukan.
- Karena waktu *milling* mempengaruhi distribusi ukuran partikel dalam proses *milling*, maka hasil uji ANOVA telah mengevaluasi secara tidak langsung distribusi ukuran partikel mempengaruhi jumlah peak spektral akustik.
- Selain waktu *milling* hasil uji ANOVA juga memperlihatkan bahwa faktor julat frekuensi ikut mempengaruhi jumlah peak spektral yang dihasilkan.

- Baik hasil evaluasi visual evolusi spektral dan evaluasi frekuensi gerus menggunakan data akumulasi peak spektral menunjukkan proses *milling* memberikan respon kuat pada julat frekuensi 160-640 Hz.
- Emisi bunyi akustik berpotensi digunakan untuk pemantauan tidak merusak secara online dan murah pada proses *milling* kering untuk mendukung industri 4.0

#### V. UCAPAN TERIMA KASIH

Kami atas nama Handoko Setyo Kuncoro selaku kontributor utama KTI dan Dadan Sumardan selaku kontributor anggota KTI mengucapkan terimakasih sebesar-besarnya kepada Balai Besar Keramik dan P2MM LIPI melalui program LPDP untuk Prioritas Riset Nasional bidang fokus Energi dengan judul riset “Litbang Pembesaran Skala Produksi Bahan Baku Baterai Lithium Merah Putih” .

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Yahya, “B4T Power House Sebagai Implementasi Teknologi Sistem Baterai Ion Litium,” in *Prosiding Seminar Nasional Riset & Inovasi Teknologi*

- Industri* 2018, 2019, pp. 126–130.
- [2] H. S. Kuncoro *et al.*, “Preparation of Titanium Phosphate as Solid Electrolyte Material for Secondary Battery,” *J. Keramik dan Gelas Indones.*, vol. 27, no. 1, p. 1, 2018.
- [3] M. H. H. Mahmoud, A. A. I. Afifi, and I. A. Ibrahim, “Reductive leaching of ilmenite ore in hydrochloric acid for preparation of synthetic rutile,” *Hydrometallurgy*, vol. 73, no. 1–2, pp. 99–109, 2004.
- [4] E. Yustanti, A. Andini, and L. H. Lalasari, “Reduksi Si dan Al pada Mineral Ilmenit dengan Metode Dekomposisi Basa Natrium Hidroksida,” *Tek. J. Sains dan Teknol.*, vol. 14, no. 1, p. 15, 2018.
- [5] Y. Yi, H. Yang, L. Sun, and X. Liu, “The Ball Mill Load Measuring algorithm though Grinding tone signal based on GA,” 2018.
- [6] J. Deng, Y. Zhang, A. Huang, R. Wang, H. Gu, and J. He, “Monitoring and analysis of ball milling process based on acoustic signal inversion,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 461, no. 1.
- [7] A. Ismail, I. Akbar Alamsyah, M. Kholil, B. Heru Susanto, and M. Nasikin, “The effect of milling time on the size of silica particles from silica sand,” in *Materials Science Forum*, 2018, vol. 917 MSF, pp. 162–166.
- [8] M. I. Abdou, M. A. E.-F. Moustafa, H. E.-S. Ahmed, and H. A. El-Wahab, “Utilization of Egyptian Ilmenite Ore for Steel Surface Preparation in Petroleum Field,” *Engineering*, vol. 03, no. 08, pp. 802–809, 2011.
- [9] V. R. Kovalyukh and M. B. Gud, “Mathematical model of a ball mill,” *Sov. Min. Sci.*, vol. 16, no. 4, pp. 373–375, 1980.
- [10] Z. Wang, Y. Han, and B. Chen, “A mathematical model for predicting the internal parameters of ball mill,” in *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 454, pp. 151–156.
- [11] L. Cunfang, Z. Taohong, Z. Dezheng, W. Huan, Z. Qingfeng, and S. Yi, “Model of Ball Mill Based on the CPS,” in *Proceedings - 2017 International Conference on Computer Network, Electronic and*

- Automation, ICCNEA 2017*, 2017, vol. 2017-Janua, pp. 198–204.
- [12] G. Yuan, W. J. Pan, S. Z. Li, and Q. Han, “Research of mathematical model of the ball mill with double inlets and outlets,” in *Proceedings - International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, ICICTA 2008*, 2008, vol. 1, pp. 674–679.
- [13] N. Magdalinovic, M. Trumic, M. Trumic, and L. Andric, “The optimal ball diameter in a mill,” *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, vol. 48, no. 2, pp. 329–339, 2012.
- [14] A. S. Erdem and Ş. L. Ergün, “The effect of ball size on breakage rate parameter in a pilot scale ball mill,” *Miner. Eng.*, vol. 22, no. 7–8, pp. 660–664, 2009.
- [15] Y. Pistun, R. Fedoryshyn, V. Zagraj, H. Nykolyn, and R. Kokoshko, “Experimental study and mathematical modelling of nonlinear control plant,” in *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, 2019, vol. 30, no. 1, pp. 967–975.
- [16] S. Rosenkranz, S. Breitung-Faes, and A. Kwade, “Experimental investigations and modelling of the ball motion in planetary ball mills,” *Powder Technol.*, vol. 212, no. 1, pp. 224–230, 2011.
- [17] C. A. Rowland, “Diameter factors affecting ball mill scale-up,” *Int. J. Miner. Process.*, vol. 22, no. 1–4, pp. 95–104, 1988.
- [18] H. Cui, Z. G. Yuan, and Z. Feng, “Data-driven Modeling of Ball Mill Load and Cement Particle Size,” in *Proceedings 2018 Chinese Automation Congress, CAC 2018*, 2019, pp. 3913–3917.
- [19] H. Watanabe, “Critical rotation speed for ball-milling,” *Powder Technol.*, vol. 104, no. 1, pp. 95–99, 1999.
- [20] M. Rijesh, M. S. Sreekanth, A. Deepak, K. Dev, and A. O. Surendranathan, “Effect of milling time on production of aluminium nanoparticle by high energy ball milling,” *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 8, pp. 646–652, 2018.
- [21] D. V. Longhurst and D. A. Longhurst, “Infrared monitoring

- techniques for real-time monitoring of ball mills,” *Cem. Int.*, vol. 8, no. 6, pp. 58–65, 2010.
- [22] A. Fuadah and Y. Pramudya, “Acoustic analysis on the voice of choir singers using Spectroid,” in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1254, no. 1.
- [23] A. Rohatgi, “WebPlotDigitizer,” <https://automeris.io/WebPlotDigitizer/>, 2015. .
- [24] M. Toozandehjani, K. A. Matori, F. Ostovan, S. A. Aziz, and M. S. Mamat, “Effect of milling time on the microstructure, physical and mechanical properties of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite synthesized by ball milling and powder metallurgy,” *Materials (Basel)*, vol. 10, no. 11, 2017.
- [25] S. P. K. Kohobhange, C. H. Manoratne, H. M. T. G. A. Pitawala, and R. M. G. Rajapakse, “The effect of prolonged milling time on comminution of quartz,” *Powder Technol.*, vol. 330, pp. 266–274, 2018.
- [26] Y. Shen, Z. Huang, and L. Zhang, “Effect of milling time on the microstructure and mechanical properties of Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub> based cermets,” *Mater. Res. Express*, vol. 4, no. 10, 2017.
- [27] A. A. Supriyanto and A. R. Daud, “Effect of milling time on microstructure of mechanically alloyed Al-Ti powders,” in *AIP Conference Proceedings*, 2009, vol. 1202, pp. 117–121.